



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MODERNÍ TRENDY VÝROBY ODLITKŮ ZE SLITIN
HLINÍKU**

MODERN TRENDS OF PRODUCTION AL-BASED CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Kovář**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy výroby odlitků ze slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S vývojem automobilového a leteckého průmyslu vzrůstá poptávka po hliníkových odlitcích nahrazujících v současnosti složitější součásti, které se dříve vyráběly např. pomocí svařování. S tím jsou spojeny vzrůstající požadavky na mechanické vlastnosti a tvarovou složitost odlitků, pro které bylo potřeba zavést nové, moderní technologie a postupy výroby, jako jsou například metody squeeze casting, semi-solid casting atd.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zpracovat přehledný soupis moderních postupů používaných při výrobě hliníkových odlitků.

Seznam doporučené literatury:

KAUFMANN, H. Metallurgy and processing of high integrity light metal pressure castings. Berlin: Schiele, 2007. ISBN 978-3-7949-0754-0.

GRUZLESKI, J.E. The treatment of liquid aluminum-silicon alloys. Des Plaines: American Foundrymen's Society, c1999. ISBN 08-743-3121-8.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 07-506-47-0-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KOVÁŘ Jan: Moderní trendy výroby odlitků ze slitin hliníku.

Tato bakalářská práce je rešerší popisující nové metody výroby odlitků ze slitin hliníku, které jsou vyvíjeny především pro potřeby automobilového a leteckého průmyslu. Popisovanými metodami jsou semi-solid casting a kompozity s kovovou maticí mezi postupy přípravy vsázky a squeeze casting a V-proces jako postupy odlévání. Dále jsou také popsány metody rapid prototyping SLS, SLM a MJF a pozorována struktura vzorku ze slitiny AlSi9Cu3 vyrobeného metodou SLM.

Klíčová slova: semi-solid casting, kompozity s kovovou maticí, squeeze casting, v-proces, rapid prototyping, SLM

ABSTRACT

KOVÁŘ Jan: Modern trends of production Al-based casting.

This bachelor thesis is a recherche discussing new methods of the production al-alloy castings, which are mainly developed for the needs of automotive and airspace industry. The described methods are semi-solid casting and metal-matrix composites as the approaches of slurry production and squeeze casting and V-process as the approaches of casting. Further are described SLS, SLM and MJF methods of rapid prototyping and the structure of SLMed AlSi9Cu3 alloy is observed.

Keywords: semi-solid casting, metal-matrix compisites (MMCs), squeeze csating, V-process, rapid prototyping, SLM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVÁŘ, Jan. Moderní trendy výroby odlitků ze slitin hliníku. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113069>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 24.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Blažíkovi za rady k vypracování práce a především pomoc s experimentální částí. V neposlední řadě bych také rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
-------------------	----------

1 ODLÉVÁNÍ SLITIN HLINÍKU	10
--	-----------

1.1 Odlévání v polotuhém stavu	10
---	-----------

1.1.1 Nový rheocasting	11
------------------------------	----

1.1.2 Kompozity s kovovou maticí.....	12
---------------------------------------	----

1.2 Squeeze casting	14
----------------------------------	-----------

1.2.1 Nepřímý squeeze casting	14
-------------------------------------	----

1.2.2 Přímý squeeze casting.....	15
----------------------------------	----

1.3 Odlévání do vakuové formy	16
--	-----------

2 RAPID PROTOTYPING	19
----------------------------------	-----------

2.1 Selective laser sintering (SLS)	19
--	-----------

2.2 Selective laser melting (SLM).....	21
---	-----------

2.3 3D tisk	22
--------------------------	-----------

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
------------------------------------	-----------

3.1 Vyhodnocení.....	25
-----------------------------	-----------

4 ZÁVĚRY	26
-----------------------	-----------

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

ÚVOD

Odlévání je nejekonomičtější způsob, jak rychle přeměnit nezpracovaný materiál na použitelnou součást. Z toho důvodu se stále více hledají možnosti, kde odlitky uplatnit. Nejvíce nových příležitostí nacházejí ve stále se rozvíjejícím automobilovém a leteckém průmyslu, kde je poptávka po součástech se stále lepšími mechanickými vlastnostmi při zachování, pokud možno co nejnižší hmotnosti. A právě do této kategorie spadají slitiny hliníku, jenž se vyznačují vysokou měrnou pevností. Avšak jednou z hlavních stinných stránek tradičních, ale i pokročilejších odlévacích technik, jako je ku příkladu vysokotlaké lití, je tvorba nedostatků, jako je například porozita. Kromě toho defekty vznikající při odlévání, jakož jsou horké slzy, či segregace by mohly případně vést ke vzniku trhliny během dokončovacích prací na odlitku. Proto byly vyvinuty nové technologie odlévání, aby pokud možno co nejlépe eliminovali tyto nedostatky. [1]

Tato práce jest rešerší, jenž se právě takovými procesy zabývá, avšak také moderními postupy přípravy vsázky užívaných pro slitiny hliníku. Dále je uveden i přehled dostupných metod rapid prototyping, jelikož tyto procesy jsou odlévání podobné a často v dnešní době nahrazují konvenční metody, je-li to výhodné. Taktéž v experimentální část je zaměřena na pozorování struktury tělesa vyrobeného metodou SLM.

Na obrázku 1 je možno pozorovat příklady odlitků ze slitin hliníku. [2]



Obr. 1 Příklady odlitků ze slitin hliníku [2]

1 ODLÉVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Zdokonalování využívání energie v posledních dekadách nabývá významu, především vlivem zvyšování cen benzínu a nafty pro spotřebitele a zavedenými normami vlád pro výrobce osobních i nákladních vozidel. Ekologické problémy, globální konkurenceschopnost i zvyšující se ceny surových materiálů posilují podněty ke snížení spotřeby paliv při zachování výkonu a pokud možno co nejnižších výrobních nákladů výrobku. Cenově nejvýhodnější způsoby k dosažení těchto cílů je zavedení lehkých materiálů ve stávajících a plánovaných provedeních automobilů. Důraz zaměřený na zlepšení účinnosti při spotřebě energie vyústil ve zvýšení výroby a využití odlitků ze slitin hliníku. [3], [4]

Hliníkové odlitky jsou úspěšně používány v hnacích ústrojích, a to zahrnuje bloky motorů, hlavy válců, písty, převodové skříně, či olejové vany. V první vlně snižování váhy se značné množství těchto částí začalo vyrábět ze slitin hliníku. Pro nejvyšší možný vliv na spotřebu paliva, tato nová role hliníkových odlitků vyžadovala výrobu nových konstrukčně složitějších součástek, materiálů a výrobních postupů. Tradičně se z oceli stále vyrábí příčky, zavěšení a ramena nápravy, podpěry, brzdové ventily, rotory a třmeny. Automobilová konstrukce založená na slitinách hliníku může oproti konstrukci z oceli mít za následek snížení vyprodukovaných zplodin v motoru až o 20 kg během celé doby provozu za každý kilogram oceli nahrazený lehčí slitinou hliníku, jelikož dojde k nižší spotřebě paliva. [3], [4]

Nejpodstatnější překážkou v přijetí slévárenských slitin hliníku v těchto i spoustě dalších konstrukčních aplikací byla jejich pověst ohledně nestálosti. Překonání této překážky vyžadovalo důkaz integrity a spolehlivosti odvozený z vývoje výrobních postupů a jejich efektivní kontroly. Aby odlitky byly ekonomicky výhodné, musí být konsistentní se stálou kvalitou, aby nebylo zapotřebí rozsáhlých kontrol a nedestruktivních vyhodnocování. [3]

Každý krok ve vývoji byl výsledkem úzké spolupráce mezi slévárnami a automobilkami. Nejenže musí být dosaženo specifikovaných technických kritérií pro každou novou součást, ale provedení a řízení procesu musí vykazovat schopnost neustále vytvářet produkt odpovídající kvality a ve velkém množství, jež jsou vyžadovány. Nové slévárenské procesy, slitiny, kompozitní složení, tepelné zpracování, metody řízení procesu a senzory a ovládací prvky, jež využívají, přispěli k rychlému rozvoji technologií, který byl umožněn výzkumem a programy pro rozvoj. Technologický pokrok dosažený v automobilovém průmyslu ovlivňuje všechny fáze, jimiž hliník ve slévárně prochází. [3]

1.1 ODLÉVÁNÍ V POLOTUHÉM STAVU

Odlévání částečně ztuhlého kovu, či častěji známého jako semi-solid casting, má spoustu výhod a je ho běžně využíváno například při vysokotlakém lití. Jelikož značná část tepla je odebrána z vsázky ještě před odlitím, kovové formy pracují za nižších teplot v porovnání s odléváním plně roztaveného kovu, což redukuje tepelný šok, který může působit trhlinky ve formě, a tudíž prodlužuje její životnost. Také chladnutí odlitku je rychlejší, což zvyšuje produktivitu. Jako další výhoda je uváděno snížení porozity, jelikož značná část kovu ztuhla ještě před odlitím, to se projevuje především nižší tvorbou bublinových řetězců, což je běžně se vyskytující problém u vysokotlakého lití za použití zcela tekutého kovu. Celkově se tak zlepšují mechanické vlastnosti odlitku. [5], [6]

Nevýhody zpracování částečně ztuhlého kovu se pojí se zvýšením nákladů na jeho výrobu a v některých případech potřeba zvýšené regulace, aby byla vytvořena správná směs. Tato regulace ovšem může být i automatizovaná. Během průběhu míchání, ve kterém rostou a roztrhávají dendrity, některé, avšak ne všechny, procesy mají sklony vytvářet oxidy ve vsázce. Výsledkem je vsázka, jenž obsahuje vrstvičku oxidů kolem, či dokonce uvnitř pevné fáze. Ta pak negativně ovlivňuje vlastnosti výsledného odlitku. Naštěstí tato vada je v podstatě rovnoměrně rozmístěna a jednotlivé vrstvičky bývají velmi podobné, respektive malé, co se

jejich rozměrů týče. Ve výsledku vlastnosti odlitku nemusí být optimální, avšak i tak homogenní a dostatečně spolehlivý. [5]

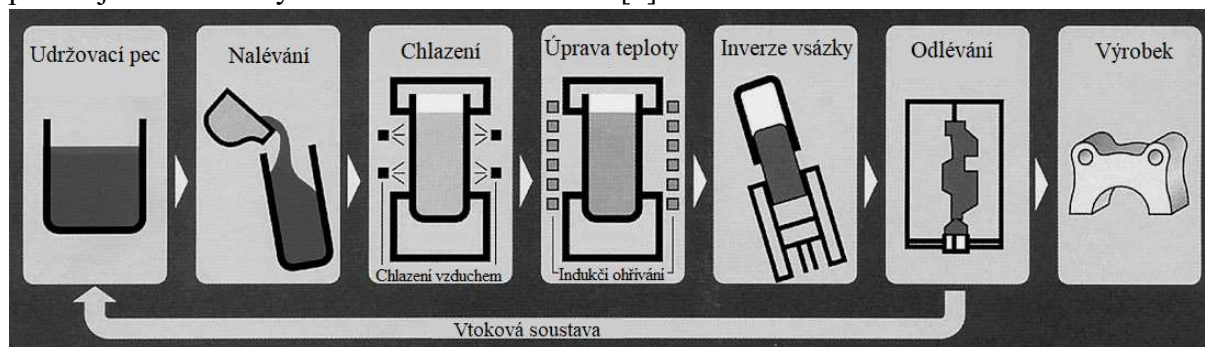
Jednotlivé procesy odlévání částečně ztuhlého kovu jsou:

- Rheocasting – je proces, ve kterém je částečně ztuhlá slitina, avšak stále tekutá, vytvořena opatrným ochlazováním taveniny do stavu, kdy se ve vsázce vyskytuje tavenina i tuhá fáze. Vsázka je mezitím mechanicky míchána, aby bylo zajištěno rozbití dendritů a tvorba kompaktních, kulovitých tvarů tuhé fáze. [5]
- Thixocasting – je podobný proces jako rheocasting, avšak v tomto případě je směs předpřipravena pomocí semi-kontinuálního lití do podoby kulatiny. Tu je následně třeba nařezat na správnou délku, dle objemu připravovaného odlitku, indukčně znovu ohřát na lici teplotu, robotem přemístit do plnicí komory stroje na vysokotlaké lití a následně odlít. Tento způsob ovšem doprovází zvýšená cena, kvůli rozdělenému postupu výroby, při opakovaném zahřívání materiálu. Navíc je problém s recyklací přídavného materiálu, jakož jsou vtokové soustavy, či vadné odlitky. [5] [7]
- Příprava vsázky právě v čas – je postup vyvíjený v posledních dvou dekáдах, jenž eliminuje oba hlavní nedostatky thixocastingu. Cílem tohoto procesu je připravit materiál požadované kvality v, pokud možno, co nejkratším čase před samotným odlitím, aby se snížili náklady na výrobu. [5]
- Tavenba elektrickým proudem – vytváří tixotropní stav, že je nejprve deformována slitina v pevné fázi a následně zahřívána v místě deformace. Tento přístup zamezuje tavení, a tak i dostání se vzduchu a oxidů do materiálu, jak tomu mnohdy bývá u jiných postupů. Oproti tomu je tento proces ovšem cenově náročnější nežli ostatní možnosti tvorby částečně ztuhlého kovu. [5]

1.1.1 NOVÝ RHEOCASTING

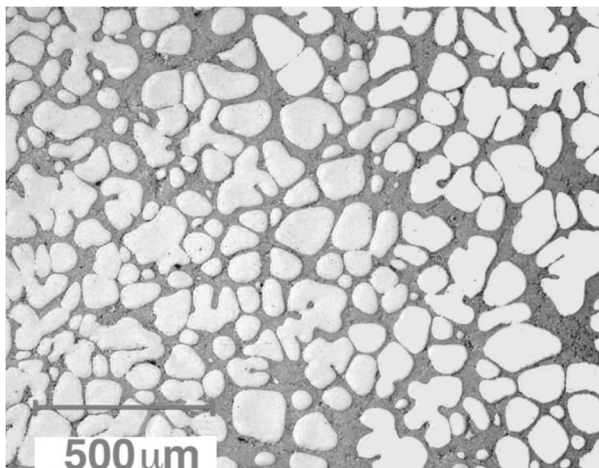
Na veletrhu GIFA 99 představila UBE Industries Ltd. nově patentovaný proces odlévání v polotuhém stavu nazvaný nový rheocasting (NRC). Tento postup kombinuje technologii squeeze castingu s novým postupem přípravy vsázky. Klíčem k dosažení dobrých výsledků u odlévání částečně ztuhlého kovu je právě jeho příprava a u slitin hliníku je ideální, pokud se ve vsázce jako tuhá část objevují kulovité částice tuhé fáze α . [7]

Příprava vsázky probíhá tak, že je nejprve kov zcela roztaven a ponechán v tekutém stavu v udržovací peci. Když je z ní vyjmut, je následně nalit do speciálně navrženého tavícího kelímku, který je umístěn na karusel, jenž je v bezprostřední blízkosti liciího stroje. Opatrným ochlazováním je tavenina přivedena na teplotu mezi likvidem a solidem a díky tomu se tvoří kolovitá mikrostruktura pevné fáze. V posledním kroku na karuselu se teplota vyrovná v celém objemu kelímku. Částečně ztuhlý kov je poté nalit do skloněné vstřikovací komory stroje pro nepřímý squeeze casting, komora se přistaví k formě a odlitek je již klasicky odlit. Tento proces je schematicky znázorněn na obrázku 2. [7]



Obr. 2 Kroky procesu nového rheocastingu [7]

Plnění formy je pomalé a se spodním vtokem stejně jako u nízkotlakého lití. To zaručuje laminární proudění a umožňuje vytlačit vzduch z dutiny formy bez toho, aby pronikl do odlitku. Tuhnutí probíhá za stálého tlaku, jehož hodnota je maximálně 130 MPa. Po vyndání součásti je přebytečný kov z vtokové soustavy odříznut navrácen k recyklaci. Rychlost tuhnutí, a tudíž i rychlost produkce je kratší oproti odlévání zcela zkapalněného kovu, jelikož je třeba z odlitku odvést méně tepelné energie. Životnost formy je taktéž prodloužena, jelikož pracuje při nižších teplotách. [7]



Obr. 3 Mikrostruktura AlSi7Mg0,3 [7]

Typická mikrostruktura AlSi7Mg0,3 odlitého pomocí nového rheocastingu je na obrázku 3. Lící teplota vsázky byla 630 °C. Lze vidět kulovitý tvar α -Al fáze obklopen eutektikem, tvořeného fází α a jehlicemi křemíku. Kulovitý tvar je vyžadován, aby byli dosaženy lepší mechanické vlastnosti. Jedním z hlavních aspektů jeho dosažení je laminární tok vázky při plnění tavicího kelímku, který se následně umístí na karusel. Laminárního toku může být dosaženo řízeným litím taveniny po stěně nakloněného kelímku. [7], [8]

1.1.2 KOMPOZITY S KOVOVOU MATRICÍ

Částečně ztuhlé směsi může být dosaženo i přidáním pevných částic do taveniny. Zkoumání této možnosti započal Pradeep Rohatgi roku 1965 a od té doby bylo prozkoumáno mnoho kombinací. Nejčastěji používanou maticí jsou slitiny hliníku, avšak dále byli studovány ve větší míře i slitiny zinku a hořčíku a také superslitiny. Běžně přidávanými částicemi do těchto slitin jsou grafit, SiC, Al₂O₃ a nízkonákladové přísady jako popílek, odpadní zplodina z uhelných elektráren. Od té doby bylo zkoumáno spoustu dalších kombinací a výzkum pokračuje i v dnešní době, jelikož v mnohých případech je potřeba dosáhnout specifických vlastností, a to za co možná nejnížší cenu. To je význačné především pro dopravu, kde je třeba snížit spotřebu paliv, jichž je omezené množství. [4], [5]

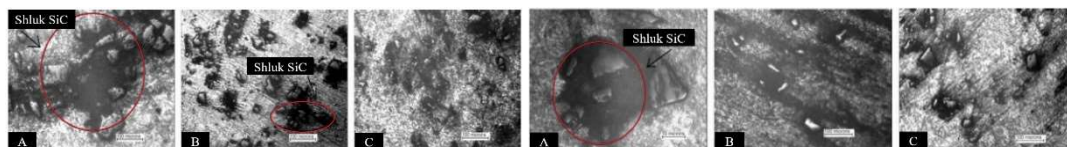
Matrice je v těchto kompozitech ve většinovém množství a do ní je přidána výztuž pro zlepšení jejích vlastností. Matrice je souvislá a homogenní v celém objemu. Výztuž je materiál, který je zapařován do matrice. Může být přidána ve formě jednotlivých vláken nebo nesouvislých krátkých vláken, vláknových krystalů, či jemných částic. [4]

K jejich hlavním přednostem patří dobré mechanické vlastnosti, nízká hustota a lepší korozivzdornost v porovnání s běžně používanými kovy a slitinami. Rozložení přidávaných vyztužujících částic v kovové matici a morfologie sekundární fáze matrice, jež vzniká v jejich okolí jsou hlavními příčinami změny mechanických vlastností. Díky své relativně nízké ceně v kombinaci s dobrými mechanickými vlastnostmi jsou kompozity s kovovou maticí lákavým materiálem jak pro vědecké, tak i pro technologické účely. Dnes se kompozitu s kovovou maticí zpracovává tisíce tun ročně, a to především v automobilovém, leteckém a obraném průmyslu. [4], [5]

Nejčastěji používaným postupem pro výrobu těchto kompozitů je takzvaný proces míchání, nebo také metoda víru, ve které jsou pevné částice nasypány do středu víru, vytvořeného rychlým mícháním tekutého kovu. Tento postup je jednoduchý a cenově nenáročný. Při míchání se používá míchačka, která je obecně vyrobena z materiálu, který odolá teplotám vyšším, nežli je teplota tavení kovu matrice. Běžně je vyráběna z grafitu. Míchačka se skládá ze dvou částí, jimiž jsou válcová tyč a rotor. Jeden konec tyče je připojený k rotoru a druhý k hřídeli motoru. Míchací tyč je obvykle ve vertikální pozici a koná rotační pohyb různými rychlostmi. Při této

metodě je nejprve kovová matrice zahřátá nad teplotu likvidu, takže je zcela v tekutém stavu. Následně je ochlazena na teplotu mezi teplotami likvidu a solidu, takže se nachází v polotuhém stavu. Poté jsou přidány předeřáté částice výztuže a kompozit je znovu zahřátý tak, aby matrice byla v plně tekutém stavu. Při tomto postupu je možno vytvořit kompozit tvořený až ze 30 % výztužným materiálem. Hlavní záležitostí spojenou s metodou míchání je segregace výztužných částic, kvůli různým proměnným tohoto procesu a vlastnostem materiálu, jenž může vyústit v jejich nehomogenní rozmístění. Rovnoměrné rozmístění přidaných částic do kovu je nezbytné pro dosažení nejvyšších hodnot tvrdosti, houževnatosti, pevnosti v tahu a dalších. Vlastnosti to ovlivňující jsou například smáčivost výztuže a taveniny, či relativní hustota. Pak lze také rozložení částic v matrici ovlivnit úpravou parametrů míchání samotného, přičemž ty, které ovlivňují proces nejvíce, jsou: [4], [5]

- Rychlost míchání – přímo ovlivňuje sílu, kterou jsou rozdělčovány shluky částic na menší. Pokud jsou otáčky míchačky nízké, působí na matrici nižší síla a výztuž se nemůže rovnoměrně rozmístit v tekutém kovu. Dokonce se mohou tvořit i nové či spojovat již existující shluky částic. Vyšší rychlost vytváří větší sílu na matrici, což napomáhá částicím se v ní pohybovat a vytváří vír pomocí něhož se částice do kovu mohou snadněji dostat. Energie dodaná mícháním o vysoké rychlosti je dostatečně velká, aby částice byly rozptýleny souměrně v matrici. Vyšší rychlost míchání ovšem přináší i riziko, že se do kovu dostane více vzduchu a zvýší se porozita výsledného odlitku. [4]
- Doba míchání – hraje důležitou roli v rovnoměrném rozdělení částic v matrici. Pokud je doba míchání krátká nedojde k rozbití shluků částic výztuže a do některých částí matrice se naopak nemusí vůbec dostat. Na obrázcích 4 a 5 lze pozorovat mikrostrukturu kompozitu s hliníkovou matricí a 10 % SiC. Rychlost míchání byla 500, respektive 600 otáček za minutu a odlity byli po A) 5 min, B) 10 min, C) 15 min míchání. Jak je vidno s rostoucím časem míchání jsou vyztužující částice rovnoměrněji rozmístěny, což přispívá ke zlepšení mechanických vlastností. [4]



Obr. 5 Mikrostruktura Al-10%SiCp
míchaného při 500 ot./min [4]

Obr. 4 Mikrostruktura Al-10%SiCp
míchaného při 600 ot./min [4]

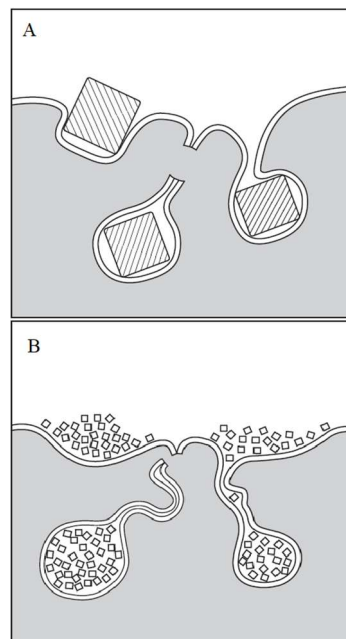
- Teplota kompozitu při míchání – také ovlivňuje výsledné rozložení částic v kovové matrici, jelikož se zvyšující se teplotou se snižuje její viskozita, a tak se vyztužující částice snáze rozmístí, což zkracuje potřebný čas k tomuto úkonu. [4]

Dalším krokem je tuhnutí taveniny obsahující výztužné částice za určitých podmínek k dosažení žádoucího rozdělení částic v matrici. Pokud je kelímek, v kterém byl kompozit míchán, opatřen spodním výtokem, je forma nachystána přímo pod tavící pec. Tento způsob uspořádání zlepšuje začlenění výztužných částic a zkracuje dobu lití. V důsledku toho jsou sice jen nepatrně zlepšeny vlastnosti odlitku, avšak je to cesta k dalšímu zlepšování. [9]

Další možností, jak dostat částice do taveniny, je pomocí přírodní trubky zavedené pod hladinu, z které se dostanou obalené ve vrstvě nosného plynu, který pomáhá zamezovat jejich sedimentaci ve směru gravitace. Když jsou pevné částice vnášeny do vsázky, musejí projít před oxidační vrstvou na jejím povrchu. To má za následek, že se částice běžně dostanou do kovu ve shlucích, jenž jsou obaleny oxidační vrstvou, kterou nevyhnutelně strhly z hladiny. Na obrázku 6 A je znázorněno, jak by měli částice do taveniny pronikat, zatímco na obrázku 6 B, lze pozorovat shluky částic, které se běžně při tvorbě kompozitu tvoří. Problém s těmito shluky

je ten, že vzduch, který obsahují, nadále houstne a zesiluje zoxidovanou vrstvu, jenž působí jako obálka, kolem shluku. Jejich velikost se může lišit a obvyklé jsou s průměrem od 10 μm , kdy jsou tvořeny jedinou částicí, do 100 μm , kdy se ve shluku mohou nacházet až stovky částic. Takto velká nekupení musejí být rozbita na co nejmenší za pomoci míchání, avšak mícháním samotným může docházet k vměstnání dalších oxidů do taveniny skrze vír. Pokud je v kompozitu vysoké procento částic, může docházet k snížení tekutosti taveniny. To ovšem není primárně způsobeno velkým množstvím pevných částic, ale vrstvami oxidů je obalujících, jenž se do kovu dostali mícháním. Velké zvýšení vrstev vzduchu má také za následek snížení tažnosti, ačkoli paradoxně může dojít k mírnému zvýšení pevnosti. [5], [9]

Dalším zdokonalením kompozitů s matricí ze slitin hliníku byl objev, že pokud je na částice nanesen povlak niklu, tak mají vyšší tendenci zůstat uvnitř slitiny. Navíc nikl exotermně reaguje s hliníkem a společně vytváří aluminidy niklu. Tím ovšem kompozit ztratí svoji výhodu přidání lehčí sloučeniny, jelikož niklový povlak má tloušťku 5 μm , a tak přidané částice obsahují přes 50 % niklu. [5]



Obr. 6 Schéma pronikání částic do taveniny [5]

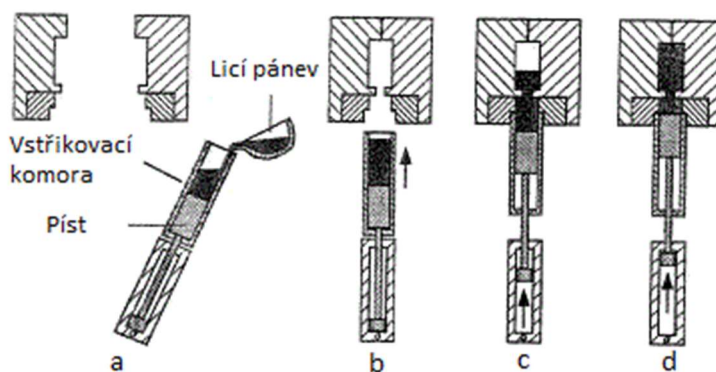
1.2 SQUEEZE CASTING

Squeeze casting má dvě varianty. Obě využívají vysokého tlaku při tuhnutí odlitku, jenž částečně zamezuje vzniku porozity a také přispívá k lepšímu přechodu tepla mezi odlítkem a lící formou pro dosažení vyšší rychlosti tuhnutí, která přispívá k lepším vlastnostem a vyšší produktivitě. [5]

V posledních dekádách se tento proces začal více využívat pro odlévání vsázek produkovaných technologií semi-solid a kompozitů s kovovou matricí, pro které se tradičně využívalo především vysokotlaké lití. [7]

1.2.1 NEPŘÍMÝ SQUEEZE CASTING

Při procesu nepřímého squeeze castingu se využívá stroj pro vysokotlaké lití, avšak s vertikální plnicí komorou, takže formu je možno plnit spodním vtokem proti působení gravitace, jak je znázorněno na obrázku 7, kde na pozici a) je ukázané plnění vstřikovací komory, v části b) je její následné umístění do pozice, ve které proběhne plnění formy pomocí pístu v komoře, jak je vidno na pozici c) a v části d) je znázorněno, jak píst kontinuálně udržuje vysoký tlak během tuhnutí odlitku. Stroj, stejně jako konvenční vysokotlaké stroje, je komplikovaný a investičně náročný. Náklady na instalaci a celková náročnost údržby nejsou banální záležitosti, jelikož jeho výška obvykle vyžaduje umístění v hluboké jámě. Stroj je velmi složitý v porovnání s přímým squeeze castingem (viz dále). A přesto nepřímý proces využívá důležité výhody technologie plnění proti gravitaci, která řeší mnoho problémů spojených s přímým procesem. Jednoduchost plněního



Obr. 7 Schéma plnění formy nepřímým squeeze castingem [1]

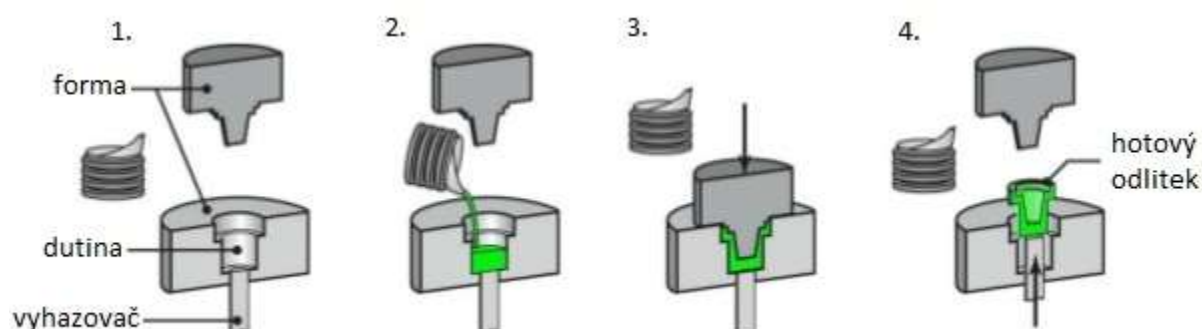
procesu zajišťuje snadné a přesné ovládání. Tavenina je přemístěna nahoru do uzavřené formy pomocí vertikálního posunutí pístu v plnicí komoře. Tlak během chladnutí je aplikován přímo tímto pístem. Tvorbě oxidů během plnění se předchází zachováním plnicích rychlostí nižších nežli kritických $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Toho je dosaženo pomocí zvětšování vtokové brány až do takových rozměrů, že je třeba přebytečný materiál odříznout a nelze jej jednoduše odlomit či odstříhnout, jak je běžné u tlakového lití. Kvůli velikosti vtokové brány je ovšem využitelnost kovu při tomto procesu často jen kolem 50 %. [1], [5]

Plnění proti působení gravitace zajišťuje, že oxidy na povrchu taveniny jsou natlačeny na povrch formy, jak tavenina stoupá, a tak chrání formu před přímým kontaktem s kovem. Z toho důvodu se neobjevuje žádné sváření, takže mohou být odlévány i slitiny s malým obsahem železa (na rozdíl od vysokotlakého lití). Navíc absence setrvačného rázu na konci plnění umožňuje lepší rozměrovou přesnost, zabraňuje „nadskoku“ formy, zatlačování kolíků, či přetoku, umožňuje větší úchytky náradí a umožňuje použití pohybujících se částí ve formě, včetně stlačitelných kolíků. I přes to je takové náradí přirozeně drahé. [5]

Za nedostatky metody je považováno, že minimální tloušťka stěny odlitku je asi 4 mm a že stroje jsou pomalejší nežli u vysokotlakého lití. Některá zpomalení jsou způsobena delší dobou potřebnou k chladnutí a některá pravděpodobně obtížnějšími úseky odlévání. Tyto nedostatky jsou ovšem zanedbatelné, pokud zákazník preferuje spolehlivost procesu. [5]

1.2.2 PŘÍMÝ SQUEEZE CASTING

Metoda přímého squeeze castingu má mnoho společného s kovááním v uzavřené formě. Tekutý kov je nalit do spodní části otevřené formy a poté následuje uzavření formy a přemístění taveniny nejkrajnějších mezí dutiny, jak je schematicky znázorněno na obrázku 8. [5], [10]



Obr. 8 Schéma odlévání přímým squeeze castingem [10]

Obecně není potřeba provoz žádného zařízení. Krom toho, jelikož vytlačení tekutiny je spíše omezené, nedosahuje se velkých vzdáleností při proudění, takže tekutost, která je běžně výhodou u slévárenských slitin, již není zapotřebí. Z toho důvodu má squeeze casting jedinečnou výhodu oproti všem ostatním metodám odlévání, a to že není omezen jen na slévárenské slitiny. Ve skutečnosti může velmi uspokojivě fungovat se slitinami pro tváření a využívat jejich znatelně vyšší mez pevnosti. Z tohoto důvodu se někdy lze setkat s označením „squeeze forming“. [5]

Další výhody metalurgické struktury materiálu zpracovaným squeeze castingem plynou z vysokého tlaku aplikovaného během tuhnutí. Rychlost tuhnutí u gravitačního či dalších způsobů lití do trvalé formy je běžně zpomalená přítomností plynů vytvořených mezi odlitkem a formou, když odlitek chladne a smršťuje se. To se u squeeze castingu neděje v takové míře a následkem vyšší rychlosti ochlazování dosahuje podstatně jemnější struktury odlitku. Použití vysokého tlaku během solidifikace má také tendenci potlačovat vznik porozity. [5]

Avšak jako vždy úplné zamezení vad není zaručeno. Například se může snadno vytvořit šev, pokud není dosaženo správné rychlosti stlačení, především pokud se objeví kaskádový efekt

během přemísťování tavení během uzavírání formy. Dokonce se může objevit porozita u tlustostěnného odlitku, především jestliže je obklopena tenkou vrstvou, která ztuhne dříve a zamezuje úplnému zavření formy a aplikaci maximálního tlaku plně uzavřené formy na tlustostěnný odlitek během pozdější fáze tuhnutí. Krom toho velký teplotní gradient vytvořený stlačením taveniny na stěnu formy vede k dendritické segregaci. Ještě hůře, eutektikum může být vytlačeno ze slitiny objevující se jako nevzhledný výpotek na povrchu odlitku. I když je tento efekt výrazný se silně segregujícími přísadami jako je měď ve slitinách hliníku, může se objevit při použití vysokého tlaku i u slitin, které běžně nevykazují žádné problémy se segregací jako například obvykle bezproblémová slitina Al-7Si-0,4Mg. [5]

Squeeze casting, stejně jako další metody odlévání do trvalých forem, je obecně omezeno na slitiny s relativně nízkou teplotou tavení, jako jsou například slitiny hliníku, zinku, či hořčíku. I když gravitační lití do trvalých forem je v omezené míře používáno i pro odlévání ocelí, něco takového je takřka nepředstavitelné pro squeeze casting, při němž by zvýšená rychlost přestupu tepla téměř jistě vedla k rychlému zničení formy. [5]

Přímý squeeze casting využívá k výrobě odlitků kovářský lis. Je to jednoduché zařízení, které stojí zlomek pořizovací ceny zařízení pro nepřímý squeeze casting. I přes to tady pravděpodobně končí výhody přímé metody v kontrastu s nepřímou. To je zapříčiněno tím, že navzdory enormnímu potenciálu tohoto procesu, jak je popsáno výše, jeho výkon je často zklamáním. Zdá se, že nedostatky jsou způsobeny několika příčinami, které není tak snadné překonat. Jsou to:

- Nedostatečná regulace taveniny před odlitím (to samozřejmě není chyba odlévacího procesu).
- Špatné přemístění taveniny do formy, jenž způsobuje tvorbu oxidů v odlitku (je doporučeno použití lící pánve se spodní výpustí k doručení taveniny do spodní části formy, pokud možno do kapsy ve dně formy, takže tavenina může být zadržena během úvodního rozstříku při vlévání do formy a obecně potlačeno víření ve formě).
- Var ochranného nátěru ve spojích formy (doporučeno opatřit formu velkými průduchy na zadní straně, nebo zajistit proud chladicí kapaliny).
- Relativně tlustostěnné odlitky (v porovnání s vysokotlakým litím) z důvodu potřebného času k zavření formy.
- Potřebná dobrá kontrola dávkování.

Tento proces je jednoduchý ačkoli je za potřebí řádného provedení k dosažení plného potenciálu. [5]

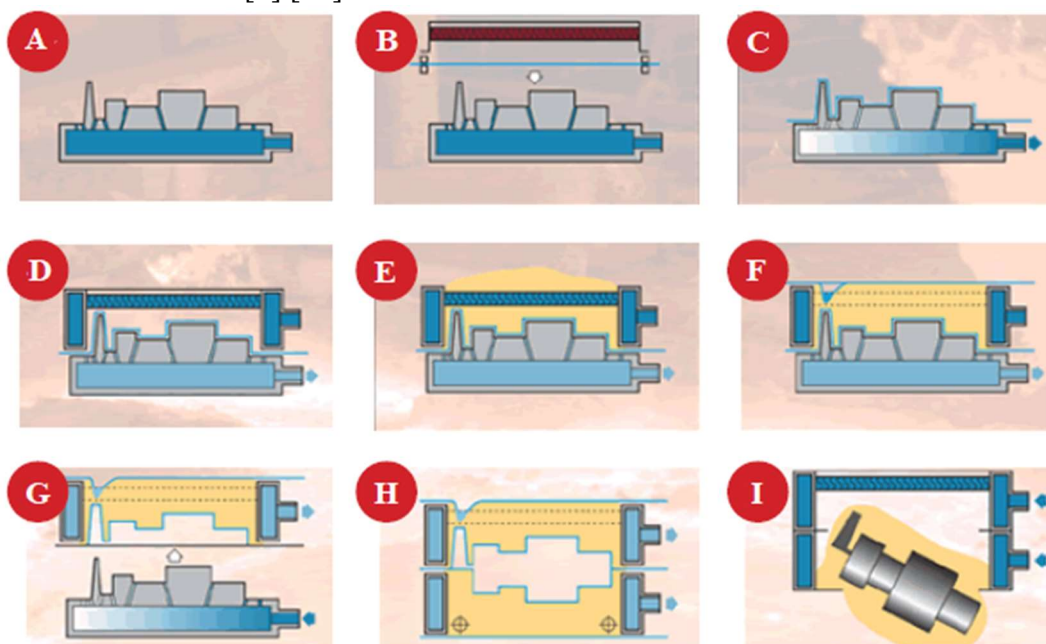
1.3 ODLÉVÁNÍ DO VAKUOVÉ FORMY

Odlévání do vakuové formy neboli V-proces je zajímavý náročný proces s pískovou formou, nevyžadující kontrolu nad materiály s nepřesným chemickým složením jako pryskyřice k podpoře pojení a tuhosti formy. Tato metoda byla vyvinuta v Japonsku roku 1972 a ihned upoutala světový zájem. [5]

Ve zkratce, využívá suchý, volně se pohybující agregát bez pojiva, obvykle křemenný písek. Forma je vyrobena ve speciálním licím rámu zataveném na horní i dolní straně plastovou fólií a ten suchý, volný písek bez pojiva je vytvrzený působením vakua (ve skutečnosti působí podtlak o hodnotě asi 0,5 atm). Tato metoda se výrazně liší od ostatních metod slévání, a tak má několik unikátních výhod a ovšem také specifické nevýhody. [5]

V praxi je plastová fólie zahřáta od shora zářením z ohřívače, aby změkla a byla roztavitelnější, jak je vyobrazeno na obrázku 9 B. Poté je fólie přisáta na model pomocí vakua, sajícího vzduch skrze otvory v povrchu modelu (obrázek 9 C). Otvory jsou propojeny s dutou podkladní deskou, ze které je vakuum. Specificky díry v modelu musejí být umístěny na dně

prohlubně, či v ostrých rozích, aby bylo zaručeno, že se fólie kompletně přisaje a věrně kopírovala tvar modelu. [5] [11]



Obr. 9 Schéma výroby formy při V-procesu [11]

Následně je na fólii nasprejován keramický povlak. Poté je třeba nechat povlak zaschnout, což je časově náročné, obzvláště po přechodu z povlaků na bázi alkoholu na typy na vodní bázi. Když je povlak zaschlý, formovací rám se usadí na model a nasype se do něj suchý písek, který je poté zpevněn pomocí vibrací (obrázek 9 D a E). V písku se utvoří licí jamka a následně je přiložena druhá plastová fólie, tentokrát nezahřátá, na vršek formy tak, aby ji utěsnila a skrze stěny formovacího rámu je odsán vzduch (obrázek 9 F). Následně se vzduch znovu vpustí do modelu, čímž se uvolní od formy (obrázek 9 G). Obdobně je vyrobena i druhá polovina formy. Forma je poté impozantně tvrdá. Dokud je sání připojeno k formovacímu rámu, s formou může být zacházeno jako s jakoukoli jinou. Hlavní nevýhodou některých interpretací tohoto procesu je manipulovatelnost s připojením sání k formě. S formou je tedy třeba zacházet opatrně, aby se předešlo úrazu. Některé slévárny tomu předcházejí automatizací procesu, či rámy s ventily, jež mohou být odpojeny od vedení podtlaku, avšak zde vzniká riziko malého uniku ve fólii a může dojít až ke kolapsu formy, při postupné ztrátě vakua. [5] [11]

Jelikož je forma velmi tvrdá, odlitky v ní vyrobené nabývají jedné z nejpresnějších rozměrů ve slévárnictví dosažitelných. Pozoruhodnou a také užitečnou vlastností V-procesu je, že díky přítomnosti plastové fólie, jež propůjčuje svou hladkost a kluzkost povrchu formy, může být model od formy oddělen téměř nulovou silou, a to i bez zkosení. Dokonce může být tolerováno negativní zkosení o pár stupňů, jelikož forma se může elasticky odpružit, pokud není deformace příliš velká. Umísťování jader je taktéž zajímavé, jelikož pasují na svá místa s nulovou tolerancí a jsou sevřena formou unikátním způsobem. Propíchnutí plastové fólie v místě styku s jádrem před jeho vložením zajišťuje, že může ventilovat, jinak by bylo jádro uzavřené od okolního světa, což by při odlévání roztaveného kovu do formy mohlo způsobit výron plynu z jádra, což by následně vedlo k defektu odlitku. (Malé díry v plastové folii jsou neškodné, pokud je neustále připojeno odsávání vzduchu z rámu.) [5]

Malý problém u V-procesu přináší křemenný agregát ve formovacím písku, odlitek může být deformován, kvůli zahřátí písku a jeho roztavení, z důvodu přeměny alfa a beta křemene, avšak přesto formy dosahují excelentních přesností. Avšak tento jev se objevuje spíše u odlévání železných odlitků. Odlitky ze slitin hliníku nenahřejí formu do takové hloubky, aby se tento jev výrazněji projevil. I tak by v budoucnu mohl být právě kvůli tomu vyvinut nový

agregát, jenž by byl vhodnější pro tento proces. Použití písku bez pojiva snižuje náklady na výrobu o cenu pojiva, což je obzvláště výhodné pro velké odlitky, jenž nevyžadují velkou rychlost produkce. [5]

V případě odlévání oceli, je plastová fólie vypařena tepelným zářením z taveniny těsně před tím, než se na dané místo dostane samotná roztavená ocel a většina páry odchází do písku, zatímco zbytek je většinou bez problému pohlcen taveninou. Ovšem u slitin hliníku nastávají problémy podstatně častěji, jelikož tepelné záření taveniny není tak výrazné, takže slitina přijde do styku s fólií ještě před jejím odpařením. Ta teprve poté vře a odpařuje se. Ideálně by vzniklá pára byla nasáta všechna do písku, avšak její menší, či větší množství může snadno proniknout do kovu jako oxidační bubliny, které tvoří bublinové řetězce skrze odlitek. Následné oxidační vrstvy a bublinové řetězce jsou často mylně považovány za vnořenou plastovou fólii. [5], [6]

Nasprejovaný keramický povlak je významným nedostatkem tohoto procesu. Obecně je zapotřebí, aby zabránil kolapsu formy během lití taveniny. Jelikož je povlak nanesen na plastovou fólii ze strany s pískem a ne u modelu, tak neovlivňuje rozměrovou přesnost. Povlak udržuje povrch odlitku po odlití a redukuje vnik taveniny do formy, který by jinak byl způsoben v ní přítomným vakuem. Také pomáhá udržet vakuum, a tak celistvost formy během odpaření fólie. Povlak je ovšem značnou nevýhodou, jelikož je nákladný, vyžaduje čas na sušení a s ním ovlivňuje rychlost výroby. [5]

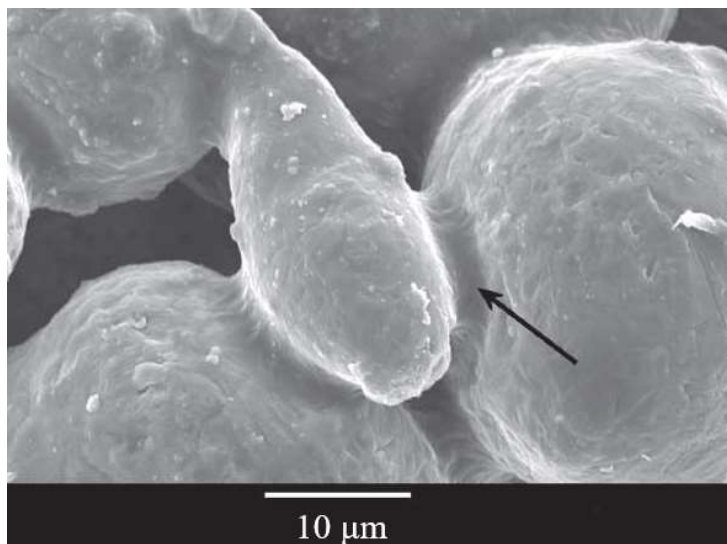
Ve vakuových formách také dochází k pomalejšímu chladnutí odlitku o 15–20 %, což je výhodné u tenkostěnných odlitků, avšak nevýhodou u produktů vyžadujících dobré mechanické vlastnosti. Dále je velké množství případů, ve kterých nelze forma vyrobit z důvodů, jenž se zdají být triviální, avšak nesmírně frustrující. Když se dvě vzprímené části modelu nacházejí blíže u sebe, nežli je hloubka mezery mezi nimi, plastová fólie má problémy se natáhnout až na dno této mezery, jelikož by bylo zapotřebí, aby se natáhla na trojnásobek své původní délky. V takovém případě se fólie běžně roztáhne. Je tedy důležité dávat pozor, aby šířka mezery byla alespoň stejná jako její hloubka. [5]

Další záležitostí tohoto procesu, jenž je běžně přehlížena, je přítomnost podtlaku uvnitř dutiny ve formě. V podstatě by ve formě neměl být podtlak. Ve skutečnosti, jestliže je vtokový kanál otevřený, ve formě bude původně atmosférický tlak. Avšak jako důsledek malých úniků skrze fólii, z částí dutiny bude odsáván vzduch. Tudíž jak se tavenina dostane do těchto částí a pokud jim odřízne spojení s atmosférou, tavenina zrychlí a může vytvořit místní turbulence. Pak může dojít ke ztrátě výhod dobře navržené vtokové soustavy, kontrola vtoku může být ztracena v různých náhodných oblastech formy, což vede k horší kvalitě odlitku. [5]

Vakuová čerpadla pracují v prostředí plném křemenného prachu, takže se běžně používají vakuová čerpadla kapalinovým prstencem, aby se zabránilo odírání povrchu těsnění. I tak údržba čerpadel je dosti nákladná. [5]

Po odlití a ztuhnutí je odlitek vyjmut z formy jednoduše vypnutím saní vakua a vpuštěním vzduchu do formovacího rámu a formy, jak lze pozorovat na obrázku 9 I. Forma se zhroutí na mříž a uvolní odlitek za minimálního úsilí. Písek propadne mříží pro recyklaci. Ztráty písku činí jen 1–2 %, přestože toto číslo vypadá nízké v porovnání s množstvím prachu vzniklým při vyndávání odlitku z formy. Prach se při rozbití formy zvedá vzhůru ve sloupci teplého vzduchu, takže se snadno roznese. Na mříži poté zůstává jen odlitek a zbytky plastové fólie. [5] [11]

laserovému paprsku, jednoduše setřen ze spečeného dílce. V této fázi je hustota součásti asi 50 % a je třeba s ní zacházet opatrně, jelikož kovové částice jsou spojeny dohromady jen polymerovými krčky, jak je vidno na obrázku 11, kde byl v procesu použit hliníkový prášek s příměsí 10 hm.% nylonu. Zvýšení hustoty může být dosaženo tepelným odstraněním polymeru a následným spečením za vysoké teploty. Avšak kvůli výraznému smrštění, které tento postup doprovází (15–20 %), je obtížné dosáhnout požadovaných rozměrů,



Obr. 11 Nylonové krčky mezi částicemi hliníku [12]

a proto je velikost součásti omezena na $\sim 1 \text{ cm}^3$. Problém se zachováním rozměrů je v podstatě eliminován, pokud je část vyplněna namísto spečena. Během tohoto procesu je původní pórovitá spečená součást prosáknuta taveninou. Běžně se používá vysoce legovaná eutektická slitina, jenž má nižší teplotu tavení nežli původní slitina, z které je vyroben prášek, aby se omezilo její natavení. Při tomto postupu jsou změny rozměrů zanedbatelné. Ovšem aby rozměry zůstaly během nasáknutí takřka nezměněny, musí být splněn předpoklad, že se před vyrobený skelet nejen utvoří, ale také, že nebude reagovat s vsakující se látkou. Ve většina infiltračních systémů je skelet vytvořen spékáním částic prášku v pevném stavu a může být provedeno jak samostatně, tak jako součást ohřevu na infiltrační teplotu. Oddělený proces je nutno použít v případě, kdy je teplota tavení vsakující se látky nižší nežli teplota spékání skeletu. Pokud je ovšem použit infiltrát s vyšší teplotou tavení, postačující skelet může být vytvořen během pomalého ohřívání na infiltrační teplotu, ačkoliv je třeba obezřetnosti, aby se předešlo přílišnému zhuštění. [12], [14]

Použití hliníkového prášku s sebou nese několik unikátních výzev. Zaprvé, hliník je pokryt termodynamicky stabilní vrstvou oxidů, jejíž tloušťka závisí na teplotě, při které byl utvořen a atmosféře v které byl skladován. Běžná vrstva oxidů na rozměrném hliníkovém tělese je 10–20 Å, zatím co se může pohybovat mezi 50 a 150 Å na hliníkovém prášku. Tato vrstva zabráňuje spékání pevných částic, a tak znemožňuje tvorbu skeletu. Avšak přidání hořčíku se ukázalo být efektivním v rušení vrstvy oxidů, a tudíž usnadňujícím při spékání pevných částic hliníku. Je tak možné vyrobit běžný spečený skelet. [12]

Je také důležité, aby skelet nebyl napaden, či rozpuštěn infiltrátem. Pokud by k tomu došlo, tak by svařenec ztratil svoji strukturální celistvost a rozměrovou přesnost. Z toho důvodu se jako infiltrát používá jiná slitina s nižším bodem tavení, nežli je teplota, při které se objeví patrné spékání. V případě používaných slitin hliníku se tato teplota pohybuje kolem 600 °C. To znamená, že volba je limitována na slitiny s nízkým bodem tavení, jakož to slitiny zinku, cínu, či olova. Avšak tato materiály jsou velmi těžké a jelikož infiltrát tvoří přibližně 40–50 % objemu součásti, byla by ztracena výhoda nízké hmotnosti hliníku. Proto vznikla potřeba zvážit použití slitin hliníku s nízkým bodem tavení, jako například eutektická slitina Al-14,7Si-4,5Mg, která se taví při 560 °C. To ovšem vytváří další problém. Ačkoli je možné vytvořit hliníkový skelet pomocí SLS procesu, použití infiltrátu na bázi hliníku zapříčiní rozpuštění spečených krčků mezi jednotlivými částicemi, a tak účinně ničí skelet. To má za následek ztrátu přesnosti, velký růst zrn a v podstatě spečenou mikrostrukturu. Proto vznikla potřeba vyvinout netradiční skelet, který byl dosažen částečnou přeměnou hliníku na nitrid hliníku. To umožňuje širší výběr infiltrátů a je možno použít v podstatě jakoukoli slitinu hliníku, jelikož předvyrobený tvar

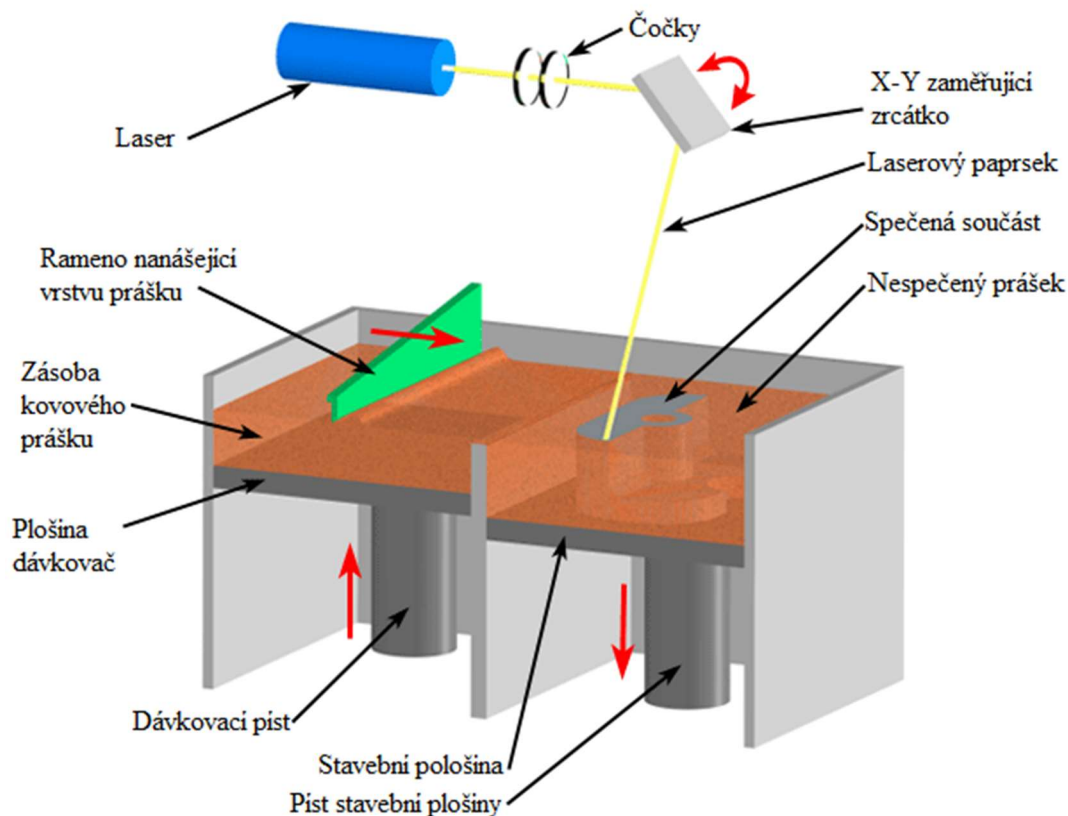
zůstává rozměrově nezměněn, i když dojde k tavení prášku. V důsledku toho je možné vybírat infiltrát na základě požadovaných vlastností namísto teploty tavení. [12]

Běžně se mohou takto vyrábět součásti s hmotností přesahující 1 kg a částmi od tloušťky 0,6 mm. Je tak možné vyrobit díl, který není možný vytvořit většinou konvenčních postupů, a to bez potřeby žádných dalších nástrojů. Především se tento proces ovšem hodí na malosériovou výrobu, či produkci geometricky velmi složitých součástí. Z ekonomického hlediska však nemůže konkurovat tradičním způsobům odlévání ve velkovýrobě. [12]

2.2 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

Dalším procesem, který umožňuje vyrábět metodou rapid manufacturing, je selective laser melting, jinak také nazýván direct metal laser sintering (DMLS). Při tomto postupu se používá vysokoenergetický laserový paprsek k úplnému roztavení kovového prášku s ochranné atmosféře kolem místa působení laseru a roztavený kov poté opět rychle tuhne. Opět proces probíhá po „dvourozměrných“ vrstvách a po každé se sníží stavící plošina a nanese se nová vrstva kovového prášku. To se opakuje, dokud není hotovo celé trojrozměrné těleso. Tento vrstvený přístup má jedinečnou výhodu ve tvorbě ucelené struktury a tenkostěnných komponent. Schéma procesu je zobrazeno na obrázku 12. [13], [14], [15]

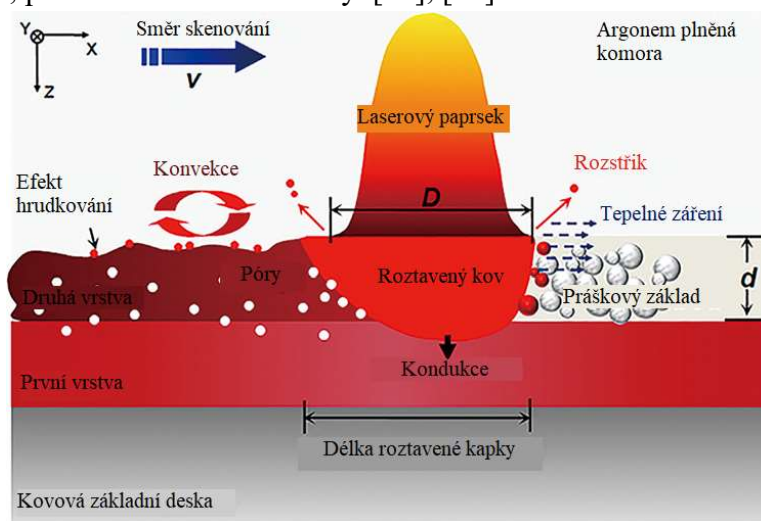
Navíc takto vyrobené součásti mají velmi dobrou kvalitu a vlastnosti. Tak jako u procesu SLS jednoduchá recyklace kovového prášku po dokončení dílu zvyšuje poměr jeho využití a redukuje výrobní náklady. Tento postup je však nepatrně rychlejší nežli SLS, jelikož celé těleso je vytvořeno během jednoho procesu. Laser působí na kovový prášek a vytváří tak malou roztavenou kapku a průměru asi 100 μm . Rychlost následného ochlazování dosahuje 10^3 - 10^8 K/s v důsledku rychlého pohybu laseru, který činí 100-1000 mm/s. Takto vysoká rychlost tuhnutí zabráňuje růstu zrn a segregaci legujících prvků. V důsledku toho společně s míchávací činností Marangoniho efektu v roztaveném kovu se utvoří jemná, homogenní



Obr. 12 Schéma SLM procesu [14]

struktura, jenž znatelně zlepšuje pevnost a tvrdost výrobku. Jakožto výsledek nerovnovážného procesu tuhnutí vzniká přesycený tuhý roztok a mohou se tvořit nové metastabilní či dokonce amorfni fáze. Nicméně kvalita povrchu a rozměrová přesnost často neodpovídají výrobním požadavkům, takže je zapotřebí dokončovacích úprav, jako jsou povrchové úpravy či obrábění, čímž se prodlužuje výrobní čas. Na druhou stranu vysoký teplotní gradient a komplexní odvod tepla způsobené cyklickým postupem výroby laserovým paprskem má za následek usměrněný růst zrn, takže mikrostruktura a vlastnosti součásti mají sklon k anizotropnosti. Kvalita dílu vyrobeného SLM procesem závisí na zvolených technologických parametrech, jako jsou výkon laseru, rychlost skenování, vzdálenost mezi jednotlivými řadami, či tloušťka vrstvy. Tyto parametry procesu se volí v závislosti na vlastnostech materiálu, jeho zabíhavosti, velikosti a tvaru částic a typu a velikosti místa dopadu laseru. Použití nesprávných parametrů může vést k hrudkování, zvýšenou pórovitost, praskání a snížení hustoty. [13], [15]

Na obrázku 13 je znázorněno působení laseru na kovový prášek a tvorba spečené vrstvy. Při kontaktu laseru s práškem dochází k mnoha komplexním jevům během rychlého tavení a tuhnutí kovu, v důsledku vstřebávání a rozptylu energie laseru. Chování roztavené lázně může být upraveno změnou výrobních parametrů. Ty je třeba nastavit tak, aby docházelo k optimálnímu růstu zrn a tvorbě specifických fází, jež jsou vyžadovány k dosažení žádané mikrostruktury a mechanických vlastností. [15]



Obr. 13 Působení laseru na kovový prášek [15]

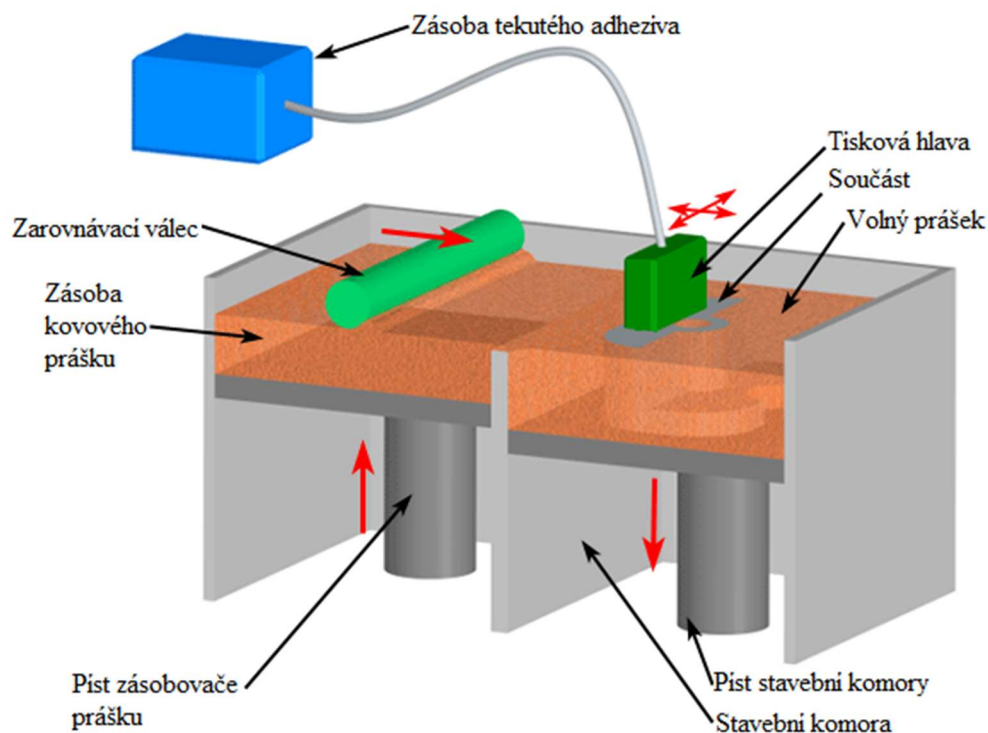
SLM technologie se používá především k výrobě plně funkčních prototypů, výrobních nástrojů, jako jsou formy či vložky, pevných krytů, potrubí, náhradních dílů, nebo tepelných výměníků a chladicích bloků. [16]

2.3 3D TISK

Tento proces, jinak také nazývaný multi jet fusion (MJF), je podobný jako selective laser sintering, také vychází ze spékání částic kovového prášku, ale namísto laseru používá k jejich spojení vstřikovací tiskovou hlavu, která materiál pojí pomocí tekutého spojovacího činidla. Kovový prášek pro tuto metodu je sice omezen množstvím použitelných materiálů, avšak oproti ostatním metodám bývá méně nákladný. Hlavní výhodou 3D tisku oproti ostatním postupům souhrnně nazývaným rapid manufacturing, je velmi vysoká rychlost tisku, běžně 2-4 vrstvy za minutu, v závislosti na parametrech procesu a tiskové ploše. Nicméně přesnost, jakost povrchu, ani pevnost nedosahují takových hodnot jako konkurenční postupy. 3D tisk se proto běžně používá především pro výrobu koncepčních modelů, případně malosériovou výrobu s nižšími nároky na mechanické vlastnosti, kde je nákladově efektivnější alternativou vstřikování do formy. U prototypů je pak možné jen omezené testování, především se provádějí zkoušky tvaru, vhodnosti a funkčnosti. [14], [16]

Schéma postupu 3D tisku je zobrazeno na obrázku 14. Proces trojrozměrného tisku začíná zvýšením zásoby prášku pomocí pístu a nanesením tenké vrstvy kovu zarovnávacím válcem na vršek stavební plošiny. Materiál je prvně lokálně předehřátý pomocí záření. Poté vícekanálová tisková hlava nanese tekuté adhezivum na cílová místa v kovovém prášku.

Částice v těchto místech jsou adhezivem spojeny dohromady a tvoří jednu vrstvu součástí. Nespojené částice zůstávají na místě jako případná podpora pro další vrstvy během tisku. Po dokončení vrstvy se stavící plošina sníží a přidá se na ni a vyrovná další vrstva prášku. Proces se opět pakuje až do dokončení celého dílu. Poté co je hotov může se prášek, který sloužil jako podpěry jednoduše otřít, či okartáčovat a znovu použít. Takto vytištěná část se většinou nadále vyplňuje infiltrátem, aby se zlepšila pevnost a kvalita povrchu, stejně jako u metody SLS. [14]



Obr. 14 Schéma procesu 3D tisku kovů [14]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro tento experiment byl jako pozorované těleso vybrán zkušební vzorek pro zkoušku únavy materiálu, vyrobený technologií SLM, jež je na obrázku 15. Použitý materiál na jeho výrobu byl AlSi9Cu3, jenž se vyznačuje velmi dobrou slévateľností, zabíhavostí a svařitelností, také je dobře obrobiteľný a odolný vůči korozi, jeho chemické složení je uvedeno v tabulce 1. [17]

Dle údajů výrobce je průměr částic v prášku obsažených 20–63 μm . Výrobní proces probíhal na stroji SLM 280^{HL}, vyráběného firmou SLM Solutions (obrázek 16), na odboru reverzního inženýrství a aditivních technologií na ústavu konstruování FSI VUT. Toto zařízení je vybaveno vláknovým laserem YLR o výkonu 400 W. Zkušební těleso bylo vyráběno v pozici s 0° natočením a skenováno ve směru výšky. A k tomuto účelu byly procesní parametry nastaveny na: výkon laseru 200 W, rychlost skenování 100 mm/s a vzdálenost skenovaných stop 110 μm . Po dokončení SLM procesu bylo těleso ještě obroběno do finální podoby a jeho rozměry jsou na obrázku 17. [18], [19]

Metalografický vzorek pro pozorování mikrostruktury byl z tělesa vytvořen v místě vyznačeném červeně na obrázku 15, jedná se o příčný řez vůči směru tisku. Toto místo bylo zvoleno jako dostatečně vzdálené od místa lomu, které lze pozorovat na obrázku 15 na 6 centimetru tělesa, způsobené únavovou zkouškou. Vzorek byl následně připraven konvenčním způsobem, tedy broušením při smáčení ethanolem a leštěním diamantovou pastou. Metalografický vzorek byl následně pozorován světelným mikroskopem v neleptaném i leptaném stavu. [17], [20]

Tabulka 1 Chemické složení AlSi9Cu3 v hm.% [19]

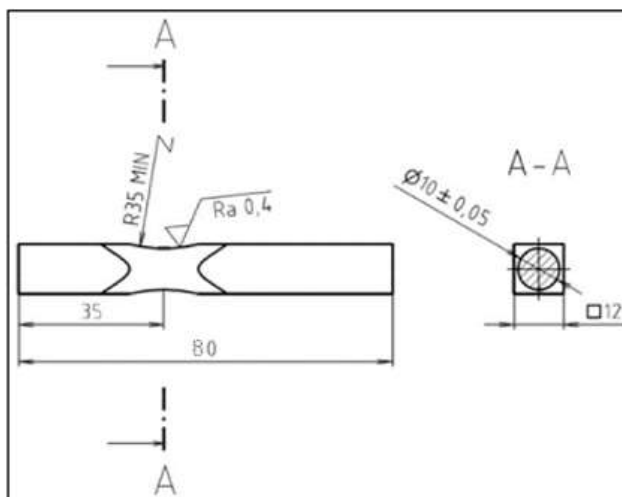
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
8,00-11,00	1,30	2,00-4,00	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,20	0,35	0,25	0,25



Obr. 15 Těleso pro zkoušku únavy materiálu



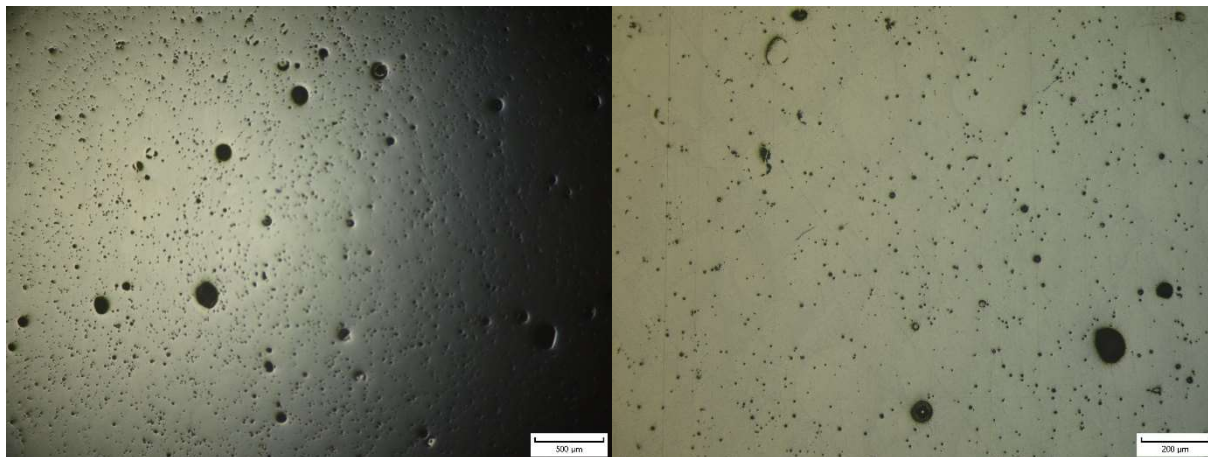
Obr. 16 Zařízení SLM 280^{HL} [18]



Obr. 17 Rozměry zkušebního tělesa [17]

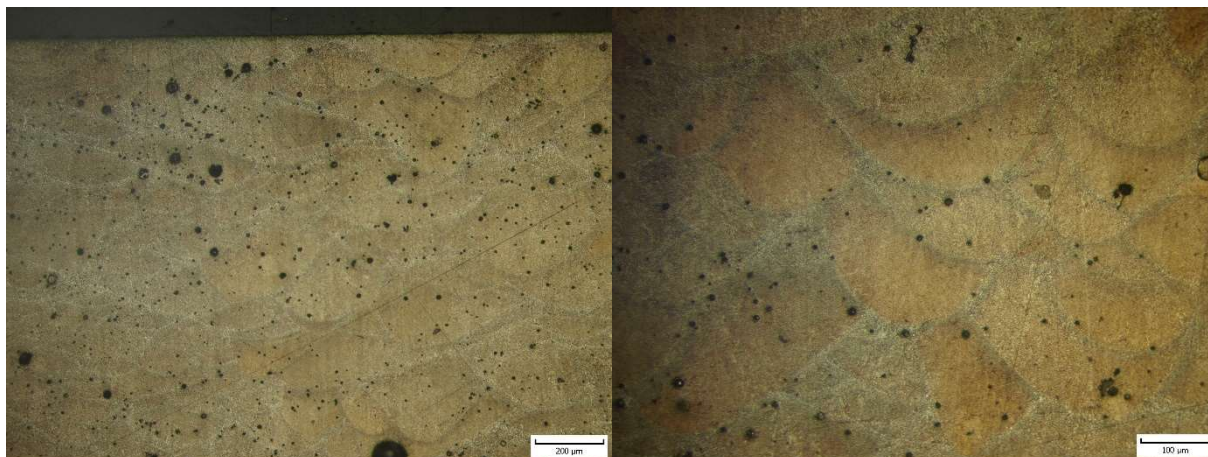
3.1 VYHODNOCENÍ

Na obrázcích 18 a 19 je vyobrazen neleptaný vzorek při čtyřicetinásobném, respektive stonásobném zvětšení. Je na nich možno pozorovat vysokou pórovitost, přičemž některé póry mají i přes 100 μm v průměru a bylo je tedy možno vidět již pouhým okem. Tyto díry jsou v materiálu nebezpečné, jelikož mohou podněcovat vznik defektů při namáhání, jakožto například trhlin. Mimo to také dochází ke zhoršení mechanických vlastností materiálu. Snížení pórovitosti lze ovšem dosáhnout úpravou výrobních parametrů. Dále pak především na obrázku 19 je patrné poškrábání povrchu vzorku, to je však způsobeno ne zcela dokonalým broušením při jeho přípravě. Další obrázky nenaleptaného vzorku jsou v příloze 1 a je na nich možno pozorovat tytéž jevy. [20]



Obr. 19 Vzorek neleptaný, 40 \times zvětšený [20] Obr. 18 Vzorek neleptaný, 100 \times zvětšený [20]

Na obrázcích 20 a 21 je již leptaný vzorek ve 100 \times , respektive 200 \times zvětšení. V tomto případě již je možno pozorovat jemnou mikrostrukturu, kterou ovšem kazí vysoká pórovitost. Především je vidět jednotlivé návary a přibližně i jednotlivé vrstvy výroby. Ty by ovšem byly lépe pozorovatelné v podélném řezu. Na obrázku 20 je také vidět poslední nejvyšší vrstva tělesa a jeho relativně hladká hrana. Další obrázky leptaného vzorku jsou v příloze 2. [20]



Obr. 21 Vzorek leptaný, 100 \times zvětšený [20] Obr. 20 Vzorek leptaný, 200 \times zvětšený [20]

4 ZÁVĚRY

Tato práce je zaměřena na nové postupy ve zpracování slitin hliníku ve slévárenství, které vznikají z důvodu stále se rozšiřujícího uplatnění těchto slitin především v automobilovém a leteckém průmyslu.

Nejprve jsou popsány nové metody přípravy vsázky odlévání kovu v částečně ztuhlém stavu neboli semi-solid casting a kompozitů s kovovou maticí. Díky těmto postupům je možno efektivněji vyrábět odlitky s lepšími mechanickými vlastnostmi, nežli je tomu v případě odlévání tekutého kovu. Nevýhodou těchto metod je delší příprava vsázky, což se také odráží v konečné ceně produktů.

Dále práce pojednává o moderních procesech odlévání samotných, a to squeeze castingu, jenž aplikuje na odlitek během fáze tuhnutí vysoký tlak, a tak jej urychluje, což zrychluje produkční cyklus, ale i zlepšuje mechanické vlastnosti v důsledku zjemnění struktury a snížení porozity. Zvláště pak nepřímá varianta tohoto procesu je využívána pro odlitky kompozitů s kovovou maticí pro další zlepšení vlastností odlévaných součástí. Dalším popsaným postupem je tak zvaný V-proces neboli odlévání do vakuové formy, díky němuž je možno vyrábět odlitky netradičních tvarů, jako třeba s mírným záporným úkosem.

Dále jsou popsány metody rapid prototyping SLS, SLM a MJF, jenž se také používají k výrobě produktů ze slitin hliníku. Jsou to dobré alternativy výroby pro malé série, nebo obzvláště složitých součástí. Především metoda SLM je využívána k těmto účelům, jelikož vyrobí produkt v jednom procesu a v závislosti na nastavení procesních parametrů nemusí být součást již dále upravována. Zbývající dva používané postupy, se poté ještě vyplňují infiltrační látkou, aby dosáhly stejných vlastností. Sice při správném nastavení mohou takto vyrobené produkty dosahovat i lepších vlastností nežli tradičně odlité, stává se tak na úkor výrobního času, a tudíž to není adekvátní způsob výroby pro velké série.

V experimentální části bylo provedeno pozorování struktury tělesa ze slitiny AlSi9Cu3 vyrobeného metodou SLM. Kromě jemné struktury byla u pozorovaného tělesa zjištěna velká pórovitost a některé póry dosahovaly až makroskopických rozměrů. Snížení porozity by bylo možné úpravou výrobních parametrů.

POUŽITÉ ZDROJE [21]

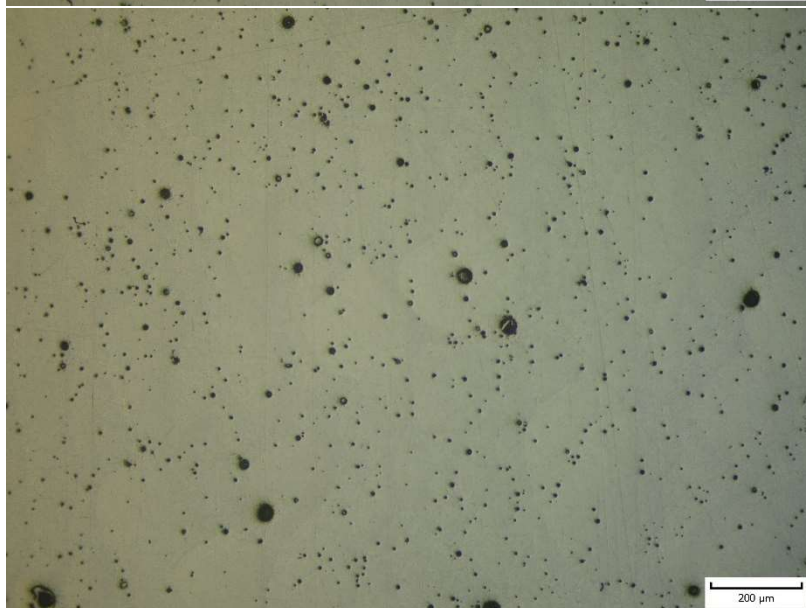
- [1] GHOMASHCHI, M.r a A VIKHROV. Squeeze casting: an overview. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2000, **101**(1), 1-9 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00291-5. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699002915>
- [2] Cast vs. wrought aluminium: standards, properties and applications. In: *Matmatch.com* [online]. b.r. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://cloud.squidex.io/api/assets/aa3dea62-a774-4182-9d94-bca5dd8af008?width=1024>
- [3] Aluminum alloy castings properties, processes and applications. *Scitech Book News* [online]. Portland: Ringgold Inc, 2005, **29**(1) [cit. 2019-04-18]. ISSN 01966006. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/200150608/>
- [4] PAL, Amit, Abhishek VERMA, Sansar Swaroop KANDPAL a Bhaskar Chandra KANDPAL. Stir Casting of Metal Matrix Composites – A Review. *International Journal of Computer & Mathematical Sciences*. 2015, **4**(), 1-3. ISSN 2347 – 8527. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/311898651_Stir_Casting_of_Metal_Matrix_Composites_-_A_Review
- [5] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*. First edition. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011, 1130 s. ISBN 1856178099.
- [6] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.
- [7] KAUFMANN, Helmut, Heimo WABUSSEG a Peter J. UGGOWITZER. *Metallurgical and processing aspects of the NRC semi-solid casting technology* [online]. b.r., , 1-11 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/284666583>
- [8] GRUZLESKI, John E a Bernard M CLOSSET. *The treatment of liquid aluminum-silicon alloys*. Des Plaines: American Foundrymen's Society, 1999, xiii, 256 s. ISBN 0-87433-121-8.
- [9] ANNIGERI, Ulhas K. a G.B. Veeresh KUMAR. Method of stir casting of Aluminum metal matrix Composites: A review. *Materials Today* [online]. 2017, **20**(4), 1140-1146 [cit. 2019-05-22]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.130>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531730130X>
- [10] DURAIRAJU, S. R., A. NAVEENKUMAR, S. PREM KUMAR a V. LOGESHWAR. A REVIEW ON MATERIAL PROCESSING OF ALUMINIUM METAL MATRIX COMPOSITES. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research* [online]. 2016, **6**(5), 26-34 [cit. 2019-04-10]. ISSN 2249-9954. Dostupné z: <https://rpublication.com/ijst/2016/oct16/3.pdf>
- [11] V-Process Casting. *Harmony Castings, LLC*. [online]. Harmony (Pensylvánie): Harmony Castings, 2014 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://www.harmonycastings.com/v-process.php>

- [12] SERCOMBE, T.B. 22 - Laser sintering and rapid prototyping of aluminium. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011, s. 702-718, 864 s. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.702>. ISBN 978-1-84569-654-2. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845696542500225>
- [13] SEDLAK, Josef, Oskar ZEMČÍK, Martin SLANÝ, Josef CHLADIL, Karel KOUŘIL, Vít SEKERKA a Luboš ROZKOŠNÝ. PRODUCTION OF PROTOTYPE PARTS USING DIRECT METAL LASER SINTERING TECHNOLOGY. *Acta Polytechnica: Journal of Advanced Engineering* [online]. Praha: Czech Technical University in Prague, 2015, **55**(4), 260-266 [cit. 2019-05-22]. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0260>. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/2493>
- [14] *CustomPartNet* [online]. Olney: CustomPartNet, b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/>
- [15] ZHANG, Jinliang, Bo SONG, Qingsong WEI, Dave BOURELL a Yusheng SHI. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2018, **35**(5), 270-284 [cit. 2019-05-22]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>. ISSN 1005-0302. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030218301804?via%3Dihub>
- [16] *Materialise* [online]. Leuven: Materialise, b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com>
- [17] KRATOCHVÍLOVA, Vendula, František VLASIC, Pavel MAZAL, David PALOUSEK a Libor PANTELEJEV. Analysis of fatigue processes of SLM materials by acoustic emission. *International Journal of Microstructure and Materials Properties* [online]. 2017, **12**(34), 193-205 [cit. 2019-05-23]. DOI: DOI: 10.1504/IJMMP.2017.091106. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/324444061_Analysis_of_fatigue_processes_of_SLM_materials_by_acoustic_emission
- [18] 3D TISK SLM. *3dlaboratory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
- [19] *SLM SOLUTIONS* [online]. Lübeck: SLM Solutions Group AG, c2018-2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com>
- [20] BLAŽÍK, Petr. *Leptaná struktura vzorku z 3D*. b.r. [e-maillová komunikace] 2. 5. 2018 10:44 [22.05.2019].
- [21] *Citace Pro* [online]. Brno: Ústřední knihovna VUT v Brně a Citace.com, s.r.o., b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady odlitků ze slitin hliníku [2].....	9
Obr. 2 Kroky procesu nového rheocastingu [7].....	11
Obr. 3 Mikrostruktura AlSi7Mg0,3	12
Obr. 4 Mikrostruktura Al-10%SiCp míchaného při 500 ot./min [4].....	13
Obr. 5 Mikrostruktura Al-10%SiCp míchaného při 600 ot./min [4].....	13
Obr. 6 Schéma pronikání částic do taveniny [5].....	14
Obr. 7 Schéma plnění formy nepřímým squeeze castingem [1]	14
Obr. 8 Schéma odlévání přímým squeeze castingem [9]	15
Obr. 9 Schéma výroby formy při V-procesu [10].....	17
Obr. 10 Schéma SLS procesu [13].....	19
Obr. 11 Nylonové krčky mezi částicemi hliníku [11]	20
Obr. 12 Schéma SLM procesu [13]	21
Obr. 13 Působení laseru na kovový prášek [14]	22
Obr. 14 Schéma procesu 3D tisku kovů [13]	23
Obr. 15 Těleso pro zkoušku únavy materiálu	24
Obr. 16 Zařízení SLM 280 ^{HL} [17]	24
Obr. 17 Rozměry zkušebního tělesa [16]	24
Obr. 19 Vzorek neleptaný, 100× zvětšený [18]	25
Obr. 18 Vzorek neleptaný, 40× zvětšený [18]	25
Obr. 21 Vzorek leptaný, 200× zvětšený [18]	25
Obr. 20 Vzorek leptaný, 100× zvětšený [18]	25

PŘÍLOHA 1 NELEPTANÝ VZOREK [20]



PŘÍLOHA 2 LEPTANÝ VZOREK [20]

